

Eude expérimentale du comportement d'assemblages collés de composites sous chargement hors plan

Experimental study of the behaviour of bonded assemblies of composites under out-of-plane loadings

L.Sohier¹, J.Y. Cognard² et P. Davies³

1 : LBMS, Université de Bretagne Occidentale 29285Brest
e-mail : laurent.sohier@univ-brest.fr

2 : LBMS, ENSTA Bretagne, 29806 Brest Cedex 9
jean-yves.cognard@ensta-bretagne.fr

3 : Service Matériaux et Structures, IFREMER, 29280 Plouzané
Peter.Davies@ifremer.fr

Résumé

L'utilisation des matériaux composites est un élément incontournable dans la stratégie de réduction d'énergie notamment dans le secteur des transports. L'étude du comportement des assemblages, notamment par collage, comprenant des éléments composites est d'une grande importance. La nature complexe des sollicitations, souvent 3D, nécessite de pouvoir caractériser les assemblages ou les composites. Or, peu de dispositifs expérimentaux permettent l'étude sous sollicitations radiales hors plan sauf pour des composites épais qui ne sont pas toujours représentatifs des applications industrielles. Le papier décrit un dispositif expérimental utilisant, en outre, un montage Arcan modifié, une optimisation de l'assemblage collé composite métal limitant l'influence des effets de bords. Des résultats, montrant le potentiel de la démarche, sont proposés, sous la forme de courbes enveloppes de ruptures (complètes ou partielles) sous sollicitations radiales hors plan ainsi que des essais cyclés en traction hors plan pour des rapports de charge positifs.

Abstract

The use of composite materials is a key element in energy reduction strategies, particularly in all areas of transportation. The study of the behaviour of assemblies of composites, including bonded assemblies, is of great importance. Complex 3D loadings are needed to analyse the response of both the assemblies and the composites. However, few experimental devices allow radial out of plane loading to be studied, except by using thick composite specimens which are not always representative of industrial applications. This paper describes an experimental device, using a modified Arcan test, an optimized hybrid bonded assembly, which limits the influence of edge effects. Some test results, showing the potential of the approach, are presented in the form of failure envelope curves for radial out of plane loading. Some out of plane tensile cycling test results with different positive load ratios are also given.

Mots Clés : Composite, Assemblage, Chargements hors plans, Adhésion.

Keywords : Composite, Assembly, Out-of-plane loadings, Adhesion

1. Introduction

Dans le domaine des transports, l'augmentation recherchée de l'efficacité énergétique passe souvent par l'utilisation de structures composites. La conception des produits s'appuie encore souvent sur l'utilisation d'assemblages rivetés ou boulonnés qui ont fait l'objet de nombreux développements mais qui peuvent réduire la résistance des structures composites du fait de concentrations de contraintes ou d'endommagement localisés au niveau des perçages. Parallèlement, la solution de l'assemblage par collage qui s'est considérablement développée ces dernières années, manque d'essais standard reconnus qui prennent en compte la nature complexe des chargements. Concernant les matériaux composites, le cas des chargements hors plan, problème pour le dimensionnement des structures composites, n'est pas beaucoup traité. Les principaux essais, dans la littérature, utilisent des éprouvettes épaisses (éprouvettes de type Iosipescu [1] ou

papillon [2,3]) pour lesquelles le système de fixation, l'usinage des éprouvettes peuvent être source de dispersions et d'incertitudes au niveau des résultats expérimentaux. Une solution intéressante est l'utilisation d'éprouvettes planes obtenues suite à la phase de cuisson sans modification de la géométrie, pour éviter les risques cités précédemment. Afin d'étudier le comportement mécanique d'assemblage par collage de composites sollicités sous chargement hors plan, un dispositif de type Arcan a été proposé. Ce dispositif permet de déterminer le comportement d'assemblages mixtes composite métal mais aussi de tester jusqu'à rupture (dans certains cas) le composite sous chargement hors plan. La conception de ce dispositif s'est appuyée sur une étude numérique qui a permis, de définir une géométrie de l'assemblage pour limiter les effets de bord en vue d'obtenir des résultats expérimentaux les plus fiables possibles. Concernant la problématique du chargement hors plan, les besoins industriels sont deux types :

- caractériser un assemblage pour une procédure de fabrication donnée définie avec un joint de colle pouvant être à l'origine de la rupture mais tout en cherchant néanmoins à augmenter au mieux la résistance de l'assemblage.
- chercher, à l'aide d'un assemblage collé, à déterminer soit la résistance à rupture des composites sous chargement hors plan ou bien le comportement de l'assemblage collé, pour optimiser la conception de l'assemblage.

Le choix de la colle et de la procédure de collage sont des éléments importants à prendre en compte dans l'étude. Nous nous plaçons ici dans le second cas où nous cherchons à atteindre la rupture du composite sous chargement hors plan. Quelques résultats sont présentés notamment la comparaison de résistances à ruptures sous chargements monotones hors plan pour des composites de qualités différentes (procédure de fabrication). Nous abordons aussi l'influence de la nature du composite sur le comportement du joint de colle, ceci est un point essentiel pour l'identification du comportement des assemblages collés de composites. Nous montrons aussi quelques résultats d'essais cyclés ce qui induit la possibilité de déterminer les courbes d'endurance des assemblages collés de composites sous sollicitations hors plan.

2. Dispositif expérimental :

2.1 Eprouvette de type Iosipescu et autre.

L'essai normalisé Iosipescu (ASTM D5379) est utilisé pour caractériser le comportement de matériaux sous chargements de cisaillement (module de cisaillement, limite d'élasticité en cisaillement, ...), pour des matériaux métalliques et composites. Ce dispositif utilise des éprouvettes parallélépipédiques avec des entailles en « V » disposées de façon symétrique. Il existe différentes variantes de cette géométrie et du dispositif de mise en charge. Cependant, des analyses numériques ont montré [4-5] que des fissures peuvent apparaître en dehors de la partie centrale de l'éprouvette. De plus, différentes études expérimentales ont aussi montré l'influence du type de composite sur la rupture des éprouvettes de type Iosipescu [4, 6, 7]. En outre, la fabrication des éprouvettes en composite peut générer des défauts et ainsi augmenter l'influence des effets de bords [8]. Ce même type d'éprouvettes (appelé « butterfly-shaped ») peut être utilisé pour des sollicitations de traction-cisaillement en utilisant un montage Arcan [3], et des résultats expérimentaux, présentés dans la littérature, montrent que l'initiation de la rupture est observée aux mêmes endroits que pour l'essai Iosipescu. Des études numériques ont aussi souligné l'existence de concentration de contraintes près des entailles [9]. Les éprouvettes, de type « butterfly-shaped », nécessitent l'utilisation de composites épais dont l'usinage peut être complexe et peut générer des concentrations de contraintes supplémentaires. Ainsi ces essais (Iosipescu et Arcan) sont souvent caractérisés par des dispersions assez importantes.

2.2 Dispositif Arcan modifié

Le dispositif proposé pour analyser le comportement d'assemblages hybrides comprenant un stratifié de faible épaisseur, est présenté en figure 1. Une plaque composite est assemblée par collage entre deux substrats métalliques. La surface collée est de 65x10mm² et un montage de collage est utilisé pour d'obtenir une bonne qualité géométrique de l'éprouvette.

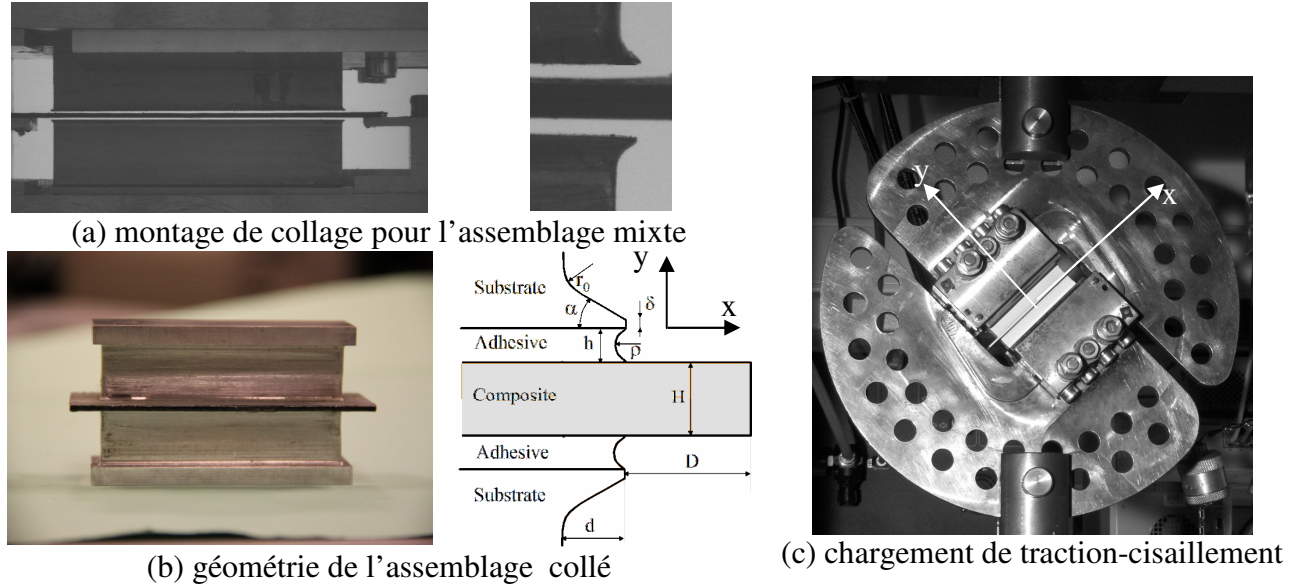


Fig. 1. Le dispositif expérimental avec l'assemblage hybride.

2.2.1 Répartitions des contraintes dans la colle et le composite

Pour cette étude, sous l'hypothèse des contraintes planes, des composites unidirectionnels carbone/époxy sont utilisés (fibres dans la direction x, figure 1) ; en effet, ils permettent l'utilisation de modèles orthotropes ($E_x = 110$ GPa, $E_y = 6,5$ GPa, $G_{xy} = 6,5$ GPa, $\nu = 0,32$) et la limite élastique utilisée est telle que :

$$\frac{\sigma_{yy}^2}{R_c^2} + \frac{\sigma_{xy}^2}{S_c^2} + \frac{\sigma_{xx}^2}{T_c^2} = 1 \quad \text{ou} \quad [\sigma_{eq_c}]^2 = 1 \quad \text{avec} \quad R_c = 20 \text{ MPa}, S_c = 52 \text{ MPa} \text{ et } T_c = 1600 \text{ MPa} [10].$$

Cette expression donne la définition d'une contrainte équivalente σ_{eq_c} pour le composite.

Le comportement de la colle (résine époxy Huntsman™ Araldite® 420 A/B) est supposé isotrope ($E_a = 2.0$ GPa, $\nu_a = 0.3$) et la limite élastique a été identifiée pour des chargements 2D en traction-cisaillement [9, 10], et est proposé sous la forme suivante :

$$\frac{\sigma_{yy}^2}{R_a^2} + \frac{\sigma_{xy}^2}{S_a^2} = 1 \quad \text{ou} \quad [\sigma_{eq_a}]^2 = 1 \quad \text{avec} \quad R_a = 40 \text{ MPa} \text{ et } S_a = 25 \text{ MPa} [10].$$

La figure 2 présente la répartition des contraintes équivalentes dans la colle et dans le composite pour des sollicitations de traction ($\gamma = 0^\circ$), traction-cisaillement ($\gamma = 45^\circ$) et cisaillement ($\gamma = 90^\circ$) pour des substrats avec bec, $\alpha = 30^\circ$; des joints de colle fins, $h = 0.2$ mm; des plaques composites de faible épaisseur, $H = 1$ mm, et avec $D = 5$ mm. Ces résultats montrent que l'utilisation de plaques composites de faible épaisseur et de joints de colle fins permet d'obtenir des résultats expérimentaux « fiables » en limitant au maximum l'influence des effets de bord. De plus, un système permettant d'assurer une sollicitation maximale au centre de la partie utile de

l'éprouvette permet de minimiser l'influence des défauts de fabrications et de positionnement. Il est important de noter que pour un chargement de traction-cisaillement, la limite d'élasticité est obtenue en premier dans le composite. L'utilisation de joints de colle très fins peut entraîner une augmentation de limite d'élasticité.

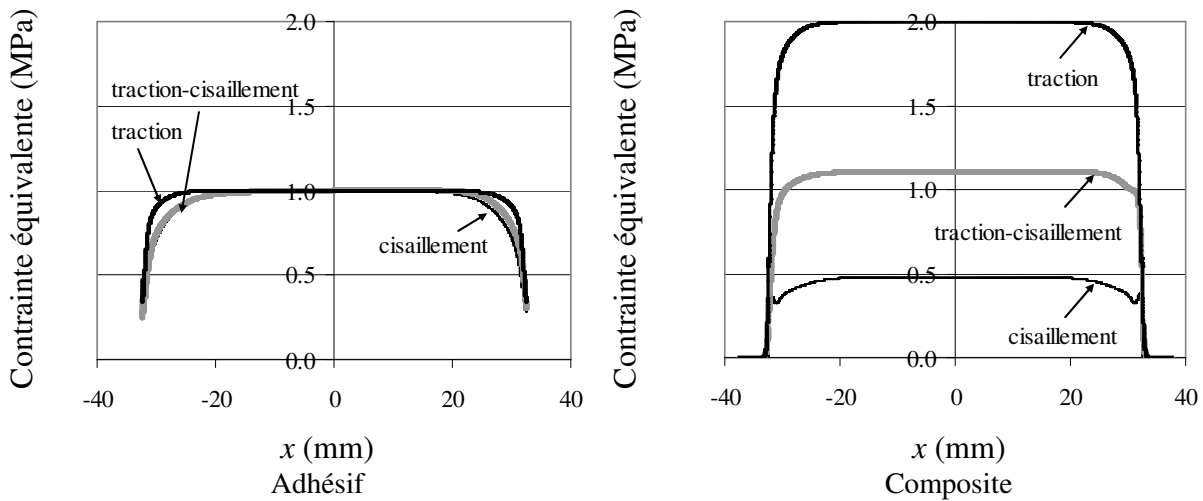


Fig. 2. Distribution des contraintes équivalentes dans l'adhésif et le composite sous chargement de traction ($\gamma = 0^\circ$), de traction-cisaillement ($\gamma = 45^\circ$) et de cisaillement ($\gamma = 90^\circ$) (substrats avec becs, $\alpha = 30^\circ$; joint de colle de faible épaisseur, $h = 0.2$ mm; plaques composites de faible épaisseur, $H = 1$ mm, avec $D = 5$ mm).

2.2.2 Influence de différents paramètres

Les résultats présentés précédemment montrent l'influence des effets de bord dépend d'une part des paramètres géométriques et d'autre part du chargement mécanique (angle γ , définissant le chargement de traction-cisaillement). Ainsi, il est intéressant d'analyser, en fonction de l'angle γ , les possibilités du dispositif Arcan modifié proposé.

La figure 3 présente, pour quatre différentes valeurs des paramètres, l'évolution de la valeur maximum de la contrainte équivalente dans l'adhésif et dans le composite en fonction du type de chargement de traction-cisaillement : $\gamma \in [0^\circ, 90^\circ]$. Les lignes continues représentent les valeurs maximales de la contrainte équivalente dans l'adhésif et le composite. Les lignes pointillées représentent les valeurs maximales de la contrainte équivalente dans la partie centrale de l'adhésif et le composite. Pour un angle donné γ , si les deux valeurs ne sont pas identiques, la valeur maximale de la contrainte équivalente est obtenue près des bords libres de la colle ; c'est-à-dire qu'il existe des concentrations de contraintes. Pour ces diagrammes, la valeur de la contrainte équivalente dans la partie centrale du composite est choisie égale à 1 pour les différents angles γ . Ainsi, avec ces courbes, il est possible de visualiser les types de chargements de traction-cisaillement (i.e. les valeurs de l'angle γ) pour les quels la limite d'élasticité est obtenue en premier dans le composite. Pour les différents calculs, les valeurs suivantes des paramètres ont été utilisées : $D = 5$ mm, $h = 0.2$ mm, $\rho = 1.5 * h$ (bords nettoyés).

Pour des substrats droits et des plaques de composites d'une épaisseur de 1 mm, la figure 4a montre les fortes concentrations de contraintes dans la colle et le composite. L'utilisation de substrats avec des becs fins ($\alpha = 30^\circ$) et de plaques composites d'épaisseur de 4 mm entraîne aussi des concentrations de contraintes assez importantes dans le composite (figure 3b). La figure 3c montre que le dispositif proposé, en utilisant des becs, peut être utilisé pour analyser le comportement de plaques composites d'épaisseur de 1 mm sous chargements hors plan correspondant à la plage angulaire suivante : $\gamma \in [0^\circ, 50^\circ]$. L'utilisation d'un adhésif caractérisé par une limite d'élasticité plus importante ($R_a' = 50$ MPa and $S_a' = 35$ MPa) permet d'augmenter la plage d'utilisation du dispositif expérimental, c'est-à-dire : $\gamma \in [0^\circ, 65^\circ]$ (figure 3d). En dessus de cet angle limite, la rupture va débiter dans la colle et non dans le composite.

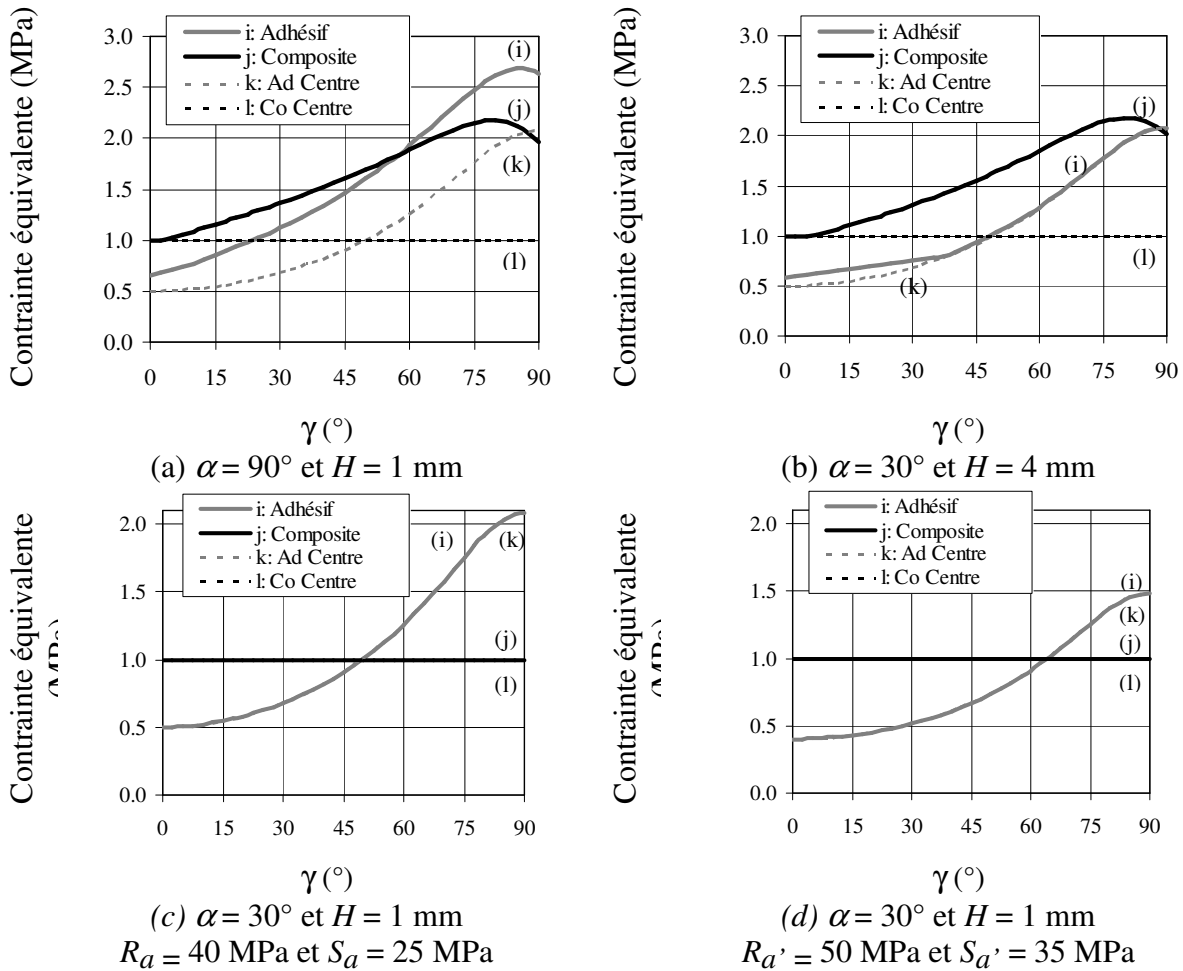


Fig. 3. Valeurs maximales des contraintes équivalentes normalisées dans l'adhésif et le composite en fonction du chargement de traction-cisaillement, $\gamma \in [0^\circ, 90^\circ]$ ($D = 5$ mm, $h = 0.2$ mm, bords nettoyés $\rho = 1.5 * h$).

2.3 Procédure de collage

L'objectif est d'optimiser la résistance de l'assemblage sous chargements hors plan. La figure 4 montre schématiquement l'évolution de l'enveloppe de rupture d'un adhésif et d'un composite. Nous cherchons à obtenir une courbe enveloppe « adhésif » couvrant un champ de contrainte normale/tangentielle si possible supérieure à celui du composite.

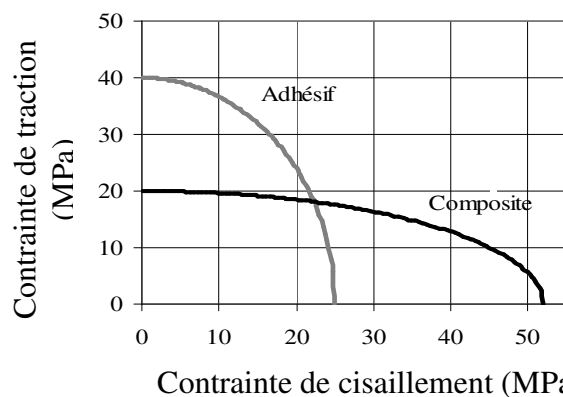


Fig. 4. Présentation schématique des limites à rupture pour la colle et le composite dans le diagramme contrainte de traction – contrainte de cisaillement.

2.3.1 Choix de l'adhésif

Nous avons identifié deux critères pour la détermination de l'adhésif. Le premier est de rechercher les adhésifs les plus performants pour les sollicitations visées. Le critère second est de choisir parmi les plus performants celui qui permet une cuisson à une température proche de celle du composite pour favoriser au maximum l'adhésion. La figure 5a donne un exemple de comportement de plusieurs adhésifs ; collage entre substrats aluminium, pour une sollicitation normale portée par \bar{y} . La figure 5b présente une comparaison pour un assemblage mixte aluminium-composite en traction, entre deux adhésifs pour une épaisseur de joint de 0,1 mm. Nous obtenons une rupture dans le composite pour l'Araldite 420 et à l'interface résine-adhésif pour l'EA-9395.

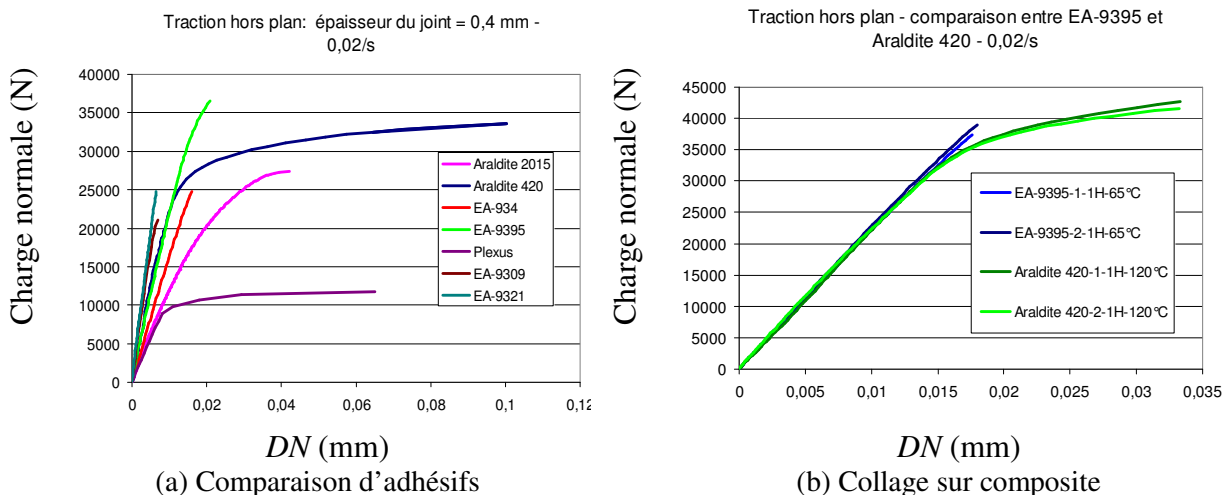


Fig. 5 : sélection d'un adhésif pour l'assemblage mixte

2.3.2 Préparation des interfaces, préparations mécaniques uniquement

Il s'agit de tester, au travers d'essais, différentes procédures mécaniques (abrasion) de préparations de surface utilisées dans l'industrie. Le sablage (sous traité chez des industriels) est comparé au ravivage (léger ponçage). L'analyse montre qu'il ne faut pas enlever complètement la résine en surface du composite. La technique de sablage, si elle n'est pas bien contrôlée, peut mettre à nu les fibres et dans le cas des UD, les endommager. Les résultats, pour les procédures de sablage, sont moyens et assez dispersifs par rapport à la procédure de ravivage, figure 6a. Pour les tissus, cela est moins sensible mais notable, figure 6b. Il est important de rechercher avant tout une liaison adhésif – résine. Nous avons retenu le ravivage, réalisé à l'aide d'un papier de grade 120.

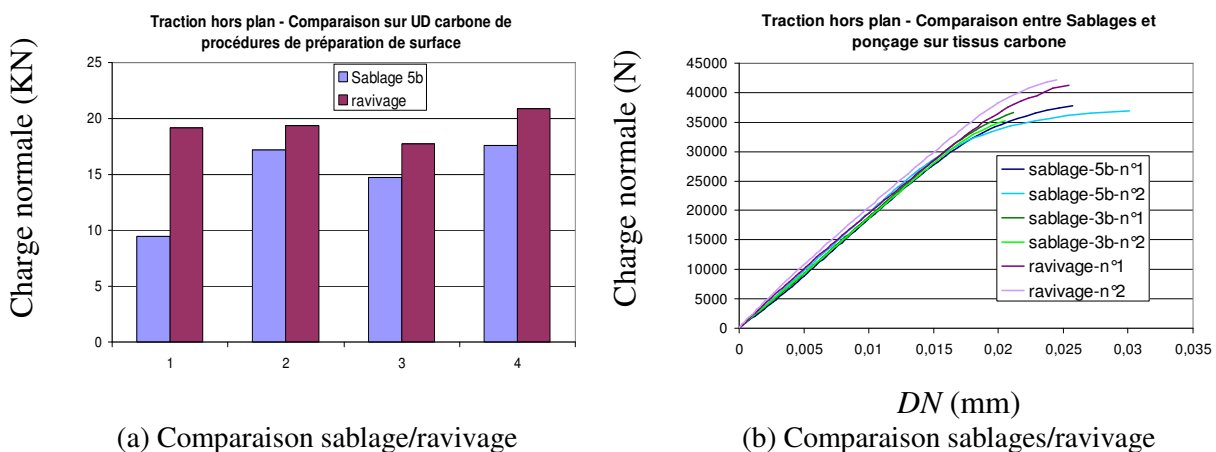


Fig. 6 : choix de la procédure de préparation de surface

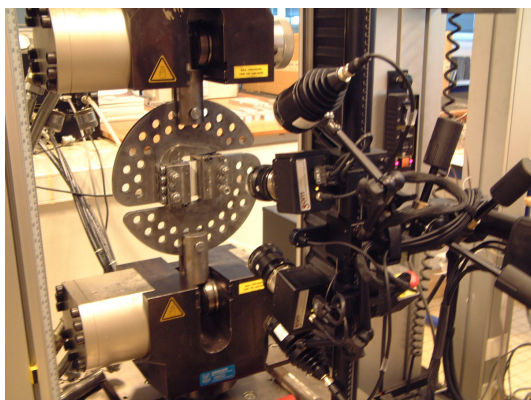
3. Mise en œuvre de la procédure expérimentale

3.1 Mesure du comportement plan de l'assemblage

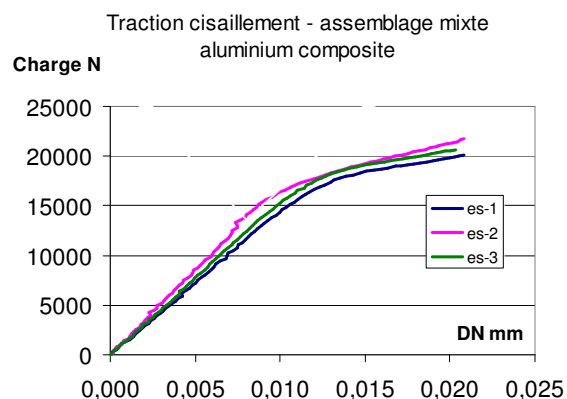
Nous venons, par analyse d'images (système ARAMIS de chez GOM), mesurer les déplacements plans DN et DT, figure 7a, au niveau des substrats. DN et DT sont les déplacements relatifs des substrats métalliques, ils permettent donc de qualifier la déformation du joint de colle ou de l'assemblage collé avec composite. La sensibilité et le fait que le système d'analyse 3D soit insensible aux petits mouvements hors plans, nous permettent d'obtenir précisément le comportement du joint et de la plaque composite.

3.2 Détermination du comportement d'un assemblage sous sollicitation traction-cisaillement 45°

Nous montrons que, lorsque l'ensemble de la procédure est respecté, les résultats sont répétitifs, figure 7b, et ainsi il est possible de limiter le nombre d'essais. Sur la figure 7b, nous montrons les déplacements normaux en fonction de l'effort normal pour un essai sous sollicitation hors plan 45° (traction-cisaillement) menant à une rupture dans le composite.



(a) Système de mesure 3D ARAMIS (GOM)



(b) Résultats peu dispersifs et précision des mesures

Fig. 7 : contexte expérimental et essais de validation

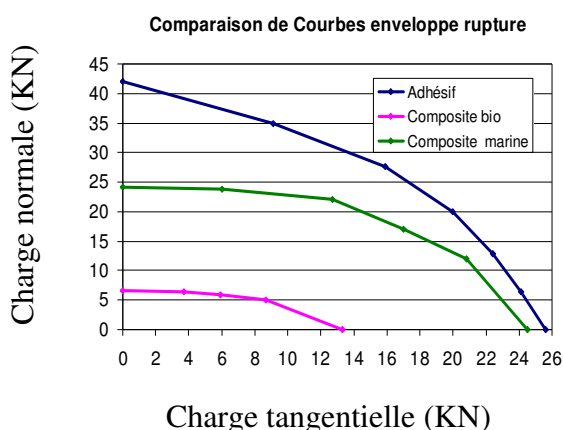
4. Courbes enveloppes de ruptures de composites

Nous voulons analyser le potentiel de la procédure pour la détermination des caractéristiques à rupture de composites de qualités diverses. Les matériaux testés sont présentés dans le tableau 1. Ils couvrent un panel assez large allant du bio composite, composite dit « marine », jusqu'à une qualité aéronautique, (cuisson autoclave).

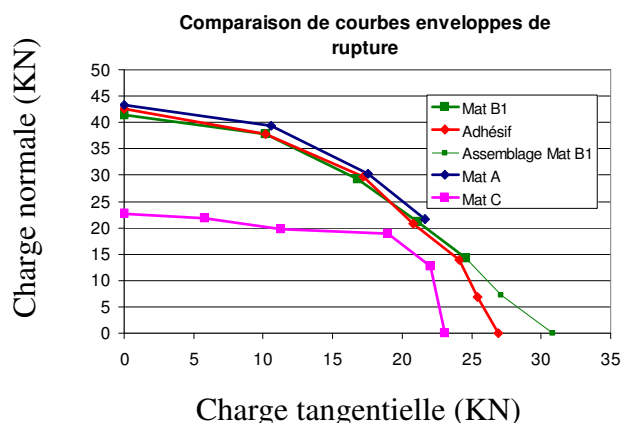
	A		B1		B2		C	
couche n°	Nature	Angle	Nature	Angle	Nature	Angle	Nature	Angle
1	V	+/-45°	C1	+/-45°	C1	+/-45°	C2	0°
2	C1	+/-45°	C1	+/-45°	C1	+/-45°	C2	0°
3	C1	+/-45°	C1	+/-45°	C1	+/-45°	C2	0°
4	C1	+/-45°	C1	+/-45°	C1	+/-45°	C2	0°
5	V	+/-45°	C1	+/-45°	C1	+/-45°	C2	0°
6							C2	0°

Tab. n°1 : définition des composites étudiés ; V : verre pregsatin 1454/49%/300grm2 ; C1 : carbone prérg G0803/M10/42%/3K/285grm2 ; C2 : carbone prérg UD/M40J/R367-2/38%/300grm2

Les matériaux A, B1 et C sont post cuits dans un autoclave sous 7 bars de pression à 120°C pendant 2-3 heures chez FMC (Brest). Le matériau B2 (composite marine) identique à B1, est post cuit sous 1,9 bars de pression à 100°C pendant 6 heures chez CDK (Port La Forêt). Concernant le matériau D, il s'agit d'un bio composite fabriqué au LIMATB (Lorient) à base de Lin et de résine bio thermoplastique PLA. Les courbes enveloppes sont obtenues à partir de valeurs moyennes issues d'au moins 3 essais pour chaque condition. Sur la figure 8a, nous comparons la résistance de deux composites, dont un issu du secteur du nautisme de compétition (matériau B2), par rapport à celle de la colle obtenue pour une épaisseur de joint identique entre deux substrats aluminium. Toutes les ruptures des assemblages mixtes sont localisées dans le composite. Pour ceux-ci nous pouvons déterminer toute l'enveloppe de rupture sous sollicitations hors plan. La figure 8b montre l'analyse de composites de qualité aéronautique. La procédure ne permet pas d'obtenir l'enveloppe complète. Pour le matériau B1, au delà d'un chargement hors plan traction – cisaillement 75°, nous avons rupture, tout d'abord de type mixte à 75°, (interface métallique et composite), puis uniquement de type adhésive à l'interface métallique à 90°, figure 9b. Pour le matériau A, au-delà d'une sollicitation traction cisaillement 45°, la rupture se localise à l'interface résine fibre tissu, figure 9c. Concernant l'UD carbone, matériau C, (sens fibre correspondant à l'axe \vec{x} , figure 1.c), la rupture est de type interface fibre-matrice mais la localisation dans la plaque évolue suivant la nature du chargement ; au cœur de la plaque pour des chargement de 0° à 45°, puis au niveau de la couche supérieure de fibres de 45° à 90°, figure 9d.

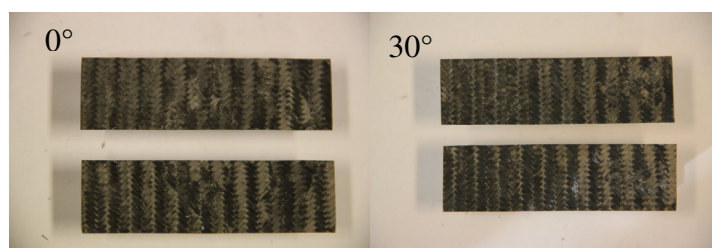


(a) Cas de composites de qualité moyenne

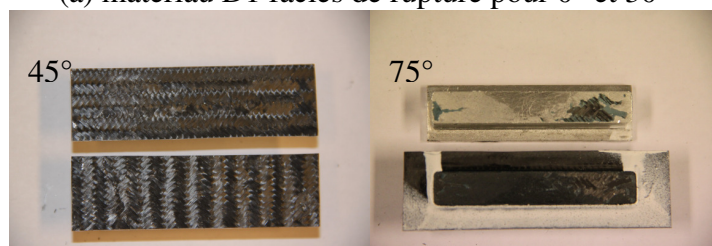


(b) Cas de composites de qualité aéronautique

Fig. 8 : Courbe enveloppe de rupture hors plan de composites



(a) matériau D1 faciès de rupture pour 0° et 30°



(b) matériau D1 faciès de rupture pour 45° et 75°



(c) matériau A faciès de rupture à 45° et +



(d) matériau C faciès de rupture à 45° et -

Fig. 9 : quelques faciès de rupture

L'analyse de ces résultats montre que la nature des substrats peut améliorer la résistance des interfaces. Si l'on regarde la limite à rupture d'un joint adhésif d'épaisseur de 0,1mm entre deux substrats aluminium (courbe « adhésif »), sa résistance au niveau de l'interface métallique est moindre que celle issue d'une phase de collage en présence d'un substrat composite ; tous les résultats de la figure 8b le soulignent. Ce résultat nous indique qu'il n'est pas possible de modéliser, directement à partir d'essais entre deux substrats aluminium, le comportement de la colle dans un assemblage mixte avec composites. Des analyses plus locales, (nano indentations, AFM en mode « Peakforce »), sont prévues pour apporter plus d'informations sur la nature de l'interface colle – composite.

5. Etude d'un composite sous quelques cycles en traction hors plan

L'objectif de cette étude est de montrer l'aptitude de la procédure à la détermination de courbes d'endurance de composites sous sollicitation hors plan. Nous avons scindé l'analyse du problème, en étudiant d'une part, le comportement de l'adhésif (Araldite 420) en fatigue et d'autre part celui du composite. Concernant l'adhésif, le comportement est peu piloté par les défauts et l'on identifie un critère de rupture pour un niveau de déformation plastique cumulé. Par contre, comme le montre la figure 10a, les résultats d'assemblages mixtes sollicités en traction cyclés montrent des dispersions assez importantes concernant le nombre de cycles à rupture pouvant laisser croire à l'influence de défauts importante au niveau des mécanismes de ruine. Nous avons testé le matériau B1 sous différents niveaux et rapports de charge positifs.

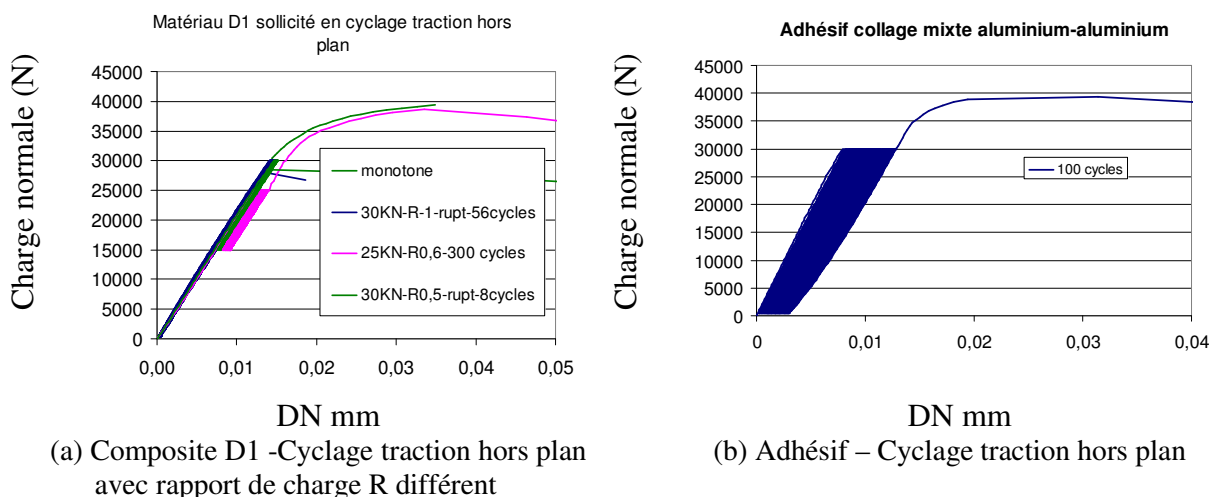


Fig. 10 : Essais cyclés sur composite B1

L'analyse montre, alors que tous les collages ont été faits en même temps, que le comportement de l'adhésif n'est pas le même suivant la nature des substrats. De plus, nous avons un comportement assez dispersif en fonction du nombre de cycles qui ne semble pas provenir du joint de colle dans la mesure où les ruptures sont toutes identiques et localisées dans le composite (figure 11). Il sera souhaitable si des défauts sont l'origine de ces dispersions de coupler aux essais une analyse par micro tomographie des plaques avant collage.

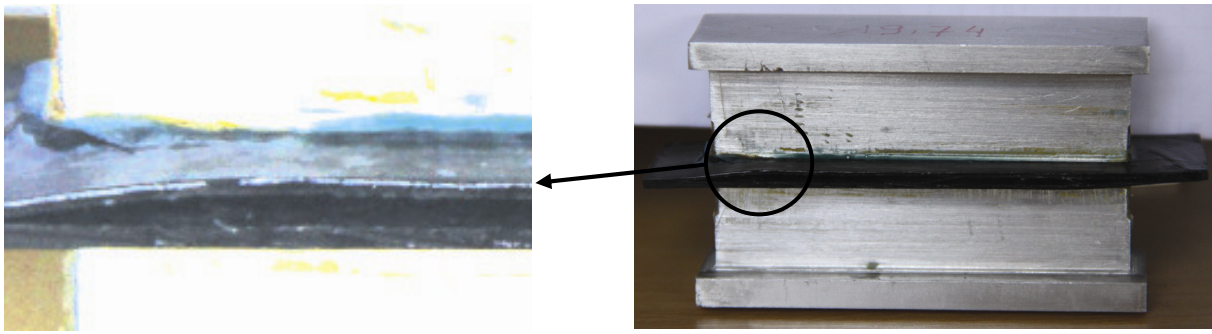


Fig. 11 : Mode de rupture sous chargement cyclique en traction hors plan pour le composite B1

6. Conclusion :

Des difficultés associées à l'utilisation de deux dispositifs expérimentaux pour la caractérisation du comportement mécanique d'assemblages mixtes comportant des composites (essai Iosipescu – Arcan éprouvette « butterfly-shaped ») ont été soulignées. Les résultats numériques et expérimentaux indiquent que le montage Arcan modifié proposé permet d'analyser le comportement d'assemblages collés hybrides si certaines conditions sont respectées; il faut limiter l'influence des effets de bords en utilisant des plaques composites fines, des substrats avec becs, un joint de colle de faible épaisseur nettoyé si possible. Cet essai permet d'analyser en premier lieu le comportement mécanique des assemblages collés hybrides avec composites et dans un deuxième temps, le comportement des composites sous chargements hors plan de traction-cisaillement. Une optimisation du choix de l'adhésif doit être réalisée, en particulier pour les chargements de cisaillement ; en effet, pour une sollicitation de cisaillement, la résistance du composite est souvent supérieure à celle de l'adhésif. Le dispositif proposé permet de déterminer l'enveloppe de rupture d'un assemblage collé hybride avec composite sous sollicitations de traction-cisaillement hors plan. De plus, les premiers essais sous chargements cycliques montrent que la détermination de courbes d'endurance peut aussi être étudiée.

Références

- [1] A.Chan, W.K.Chiu, X.L. Liu, «Determining the elastic interlaminar shear modulus of composite laminates». *Composite Structures*, Vol. 80, pp. 396-408, 2007.
- [2] M. Arcan, Z. Hashin, A. Voloshin. «A method to produce uniform plane stress states with applications to fiber reinforced materials». *Experimental Mechanics*, Vol.18, pp. 141-146, 1978.
- [3] A.Voloshin, M. Arcan, «Pure shear moduli of unidirectional fibre-reinforced materials (FRM)», *Fiber Science and Technology*; Vol 13, pp. 125-134, 1980.
- [4] F. Pierron, A. Vautrin, «Measurement of the in-plane shear strengths of unidirectional composites with the Iopescu test», *Compos Sci Technolo*, Vol 57, pp. 1653-1660, 1997.
- [5] J.S. Hawong, D.C. Shin, U.C Baek «Validation of pure shear test device using finite element method and experimental methods», *Eng Fract Mech*, Vol 71, pp. 233-243, 2004.
- [6] Y.M. Tarnopol'skii, V.L. Kulakov, A.K Aranautov, «Measurement of shear characteristics of textile composites», *Comput Struct*, Vol 76, pp. 115-123, 2000.
- [7] L.R Bradley, C.R Bowen, B. Mc Enaney, D.C Johnson, «Shear properties of a carbon/carbon composites with non woven felt and continous fibre reinforcement layers», *Carbon*, Vol 45, pp. 2178-2187, 2007.
- [8] P. Ghidossi, M. El Mansori, F. Pierron, «Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons», *Composites: Part A*, Vol 35, pp. 989-999, 2004.
- [9] A. Harman, A. Risborg, C.H Wang, «Experimental testing of BMI laminates with stress concentrations and the evaluation of SIFT to predict failure», *Compos Struc*, Vol 86, pp. 85-95, 2008.
- [10] J.Y. Cognard, L. Sohier, P. Davies, «A modified Arcan Test to analyze the behavior of composites and their assemblies under out of plane loadings», *Composites: Part A*, Vol 42, pp. 111-121, 2011.